第38卷 第6期
2021年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 6
Nov. 2021

皇甫川流域水沙变化特征及其影响因素

刘 强[1,2]， 尉飞鸿[1]， 常康飞[1]， 王 瑞[1]， 景元宁[1]， 穆兴民[2]

（1. 天水师范学院资源与环境工程学院，甘肃 天水 741000；
2. 中国科学院水利部水土保持研究所，陕西 杨凌 712100）

摘 要：基于1954—2018年皇甫川流域长时间序列降水量、径流量和输沙量监测数据，运用线性趋势法、Mann-Kendall检验、累积距平法等方法研究了皇甫川流域水沙周期演变特征，应用水文分析法定量评估了降水变化和人类活动对皇甫川流域径流量和输沙量变化的贡献率。研究结果表明：皇甫川流域降水量随时间变化呈不明显减小趋势，而径流量和输沙量随时间变化却呈显著减小趋势，且径流量减少趋势大于输沙量减少趋势。径流量和输沙量均从1986年发生由丰到枯的突变。以1954—1986年为基准期，1987—2018年人类活动对皇甫川流域径流量和输沙量的影响分别为83.04%和75.24%，降水变化对皇甫川流域径流量和输沙量影响分别为16.96%和24.76%。突变年前后输沙量出现明显的下降，产流能力对输沙量变化的贡献率超过了85%。降水变化和人类活动是造成皇甫川流域水沙减少的影响因素，其中流域内逐年增强的人类活动是促使皇甫川流域径流和输沙减少的主要因素，而气候变化引起的降水减少是次要因素。

关键词：皇甫川流域；降水量；人类活动；径流量；输沙量

河流沉积物经河流从大陆到海洋的输移是调节河岸稳定、土壤形成、元素生物地球化学循环[1]、地壳演化等与地球有关的重要过程之一[2]，然而，随着全球变化加剧，可利用水资源正在枯竭，输向海洋的泥沙量正在减少[3]，给流域管理带来许多挑战[4]。黄河是著名富含泥沙的河流，其流经平原地区由于河道拓宽、坡度减小，导致黄河中上游大量输沙在下游沉积[5]，再加上气候变化和人类密集活动[6]（土地利用变化、河流管理、兴修梯田、筑坝、退耕还林等），导致径流量和泥沙量变化，而这种变化关系到整个黄河流域生态稳定[7]。2000年以来，黄河流域输沙量出现显著减少趋势[8]，而这种变化受到国内外学者的关注，认为黄土高原地区"退耕还林（草）"工程实施，逐年增加了植被覆盖度，有效地拦蓄地表径流，减少了土壤侵蚀，调控了河道水沙，使得黄土高原地区生态环境大大改善，水沙变化情势发生了新的变化[9]。

皇甫川是黄河的一级支流，在20世纪50年代每年向黄河输送泥沙0.64×10^8 t[8]，严重的水土流失影响着流域生态环境，造成人地关系矛盾突出[10]。从20世纪60年代以来，皇甫川流域实施了一系列水土保持措施，包括梯田、大坝、水库建设、退耕还林、植被恢复等，造成流域径流量和输沙量开始减少，改变了黄河下游水沙情势[11]。新时期皇甫川流域水沙将如何变化？引起流域水沙关系变化的内在驱动因素又是什么？这些问题将会对皇甫川流域生态可持续发展和水沙调控宏观决策产生重要影响。基于此，研究采用长时间序列水沙资料对流域径流和输沙演变规律进行分析，探究降水变化和人类活动对皇甫川流域径流量和输沙量变化的贡献率，以期为皇甫川流域水土保持建设，生态环境恢复，建立流域水沙科学的调控体系提供理论依据和决策参考。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

皇甫川流域（39°12′~39°54′N，110°18′~112°12′E）

收稿日期：2021-01-27； **修订日期**：2021-03-31
基金项目：国家自然科学基金（42077075）；国家重点研发计划（2017YFE0118100）；甘肃省自然科学基金（18JR3RE247）
作者简介：刘强(1983–)，男，副教授，博士，主要从事区域资源与环境研究. E-mail: guangmingliu1983@163.com
通讯作者：穆兴民. E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

位于黄河中游河口镇与龙门区间右岸上段,属于黄河的一级支流,源于内蒙古东部鄂尔多斯准格尔旗点畔沟,流经黄土高原过渡带和内蒙古草原,在陕西省府谷县的巴兔坪汇入黄河,流域总面积3246 km²,有一级支流49条,其主要干流纳林川全长137 km,流域面积1351 km²。皇甫川流域气候类型为温带大陆性季风气候,年平均气温9.1 ℃,降水主要集中在6—9月,降水量占全年的80%以上,多年平均降水量为350~450 mm,气温和降水在空间分布上具有从东南向西北地区逐渐减少的变化特征。流域沟壑纵横,水土流失严重,土壤侵蚀以水力侵蚀为主,并复合有风力、重力侵蚀。流域地貌具有梁筛窄小、沟壑密布、地形破碎的特点,黄土厚度由西北向东南递增,土壤结构疏松,极易风化,遇高强度暴雨极易产生侵蚀,其现有的植被类型主要为草地、农田和灌木林和乔木林,过去分布的天然林和灌木草原大部分已经被人工植被所代替。

1.2　数据来源

考虑到资料连续性和完整性,根据流域内水文站点分布,研究基于1954—2018年皇甫川流域径流泥沙数据来分析水沙周期变化特征,其中1954—2009年径流和泥沙数据来自于黄河流域水文年鉴,2010—2018年来自于黄河泥沙公报。皇甫川境内有雨量站7个,但是部分雨量站数据有缺失,采用将7个雨量站的数据进行反距离加权后形成的1954—2018年皇甫川流域降水量数据,用于讨论气候变化对皇甫川水沙变化的影响。根据一些相关研究成果[5],黄土高原气温与径流量和泥沙量没有显著的相关性,所以在讨论气候变化对流域水沙影响因素中只考虑了降水因素。人类活动影响径流量和输沙量有多种方式,但是各项活动很难根据以年为单位进行分项统计,人类活动对水沙变化影响数值很难收集,加上不同年代数据统计标准不一致,造成一些统计资料失实,很难分项统计各项人类活动措施对水沙变化影响,因此,研究中仅讨论了人类活动对皇甫川流域水沙变化的贡献率[12]。

1.3　研究方法

1.3.1　径流量和输沙量阶段性变化　通过简单的线性回归分析,运用累积距平法系统分析皇甫川径流量和输沙量长时间序列阶段性差异特征。对于特定时间序列 $X_i(X_1, X_2, X_3,\cdots, X_n)$,长度为 n,累积距平值 X_t 可由下式计算[13]:

$$X_t=\sum_{i=1}^{t}\left(X_i-\bar{X}\right),\ t=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

式中:X_t 为时间序列观测值;$\bar{X}$ 是为平均值;X_i 代表第 i 年累积值。累积距平值主要检测观测值可能存在的突变点,以及观测值随时间序列变化的趋势。当观测值为正值时,说明突变点的值高于平均值,相反,为负值则说明突变点的值低于平均值。

1.3.2　输沙归因诊断分析　输沙归因诊断分析是用于判断降水、产流能力和产沙能力在皇甫川输沙量比例变化率上的贡献,从而判断出各因子对输沙量

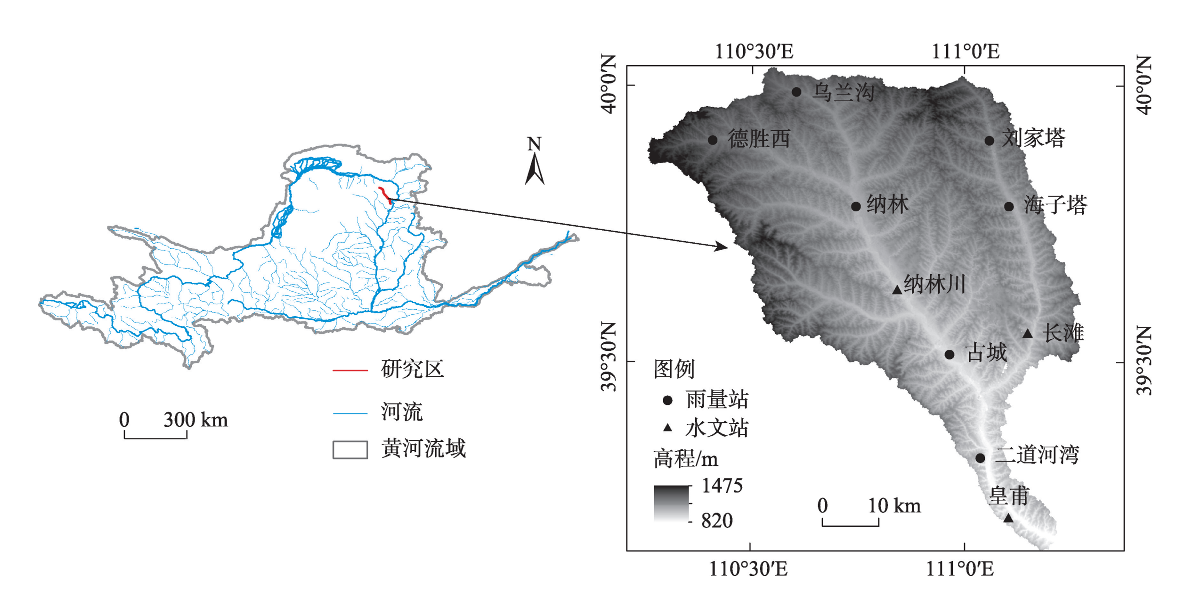


图1　皇甫川流域地理位置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the geographical location of the Huangfuchuan basin

的影响情况[14]。具体计算公式如下：

$$S=P\left(\frac{F}{P}\right)\left(\frac{S}{F}\right)=P\times f\times s \quad (2)$$

式中：P为皇甫川流域平均降水量；f为产流能力（径流量与降水量的比值）；s为产沙能力（输沙量与径流量的比值）；F为径流量；S为输沙量。

该方法定义$X(t)$的比例变化率为：$r(X)=X^{-1}\mathrm{d}X/\mathrm{d}t$，则输沙量$S$的比例变化率为：

$$r(S)=r(P)+r(f)+r(s) \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 降水量年际变化特征

从表1和图2可以看出，1954—2018年皇甫川流域年均降水量为419.78 mm，变异系数为0.30，属于中等尺度变异。最大降水量为715 mm，出现在1967年，最小值为211.3 mm，出现在1965年。20世纪皇甫川流域各代际降水量呈逐步减少的趋势，进入21世纪降水量才呈现出逐渐增大的趋势。降水量变异系数变化范围为0.25~0.37，其平均值为0.30，属于中等尺度变异。降水量极值比介于2.31~3.39，其均值为2.73。降水量减少速度为0.71mm·a^{-1}（$P>0.1$），没有达到显著性水平，表明1954—2018年皇甫川流域降水量呈不显著减小趋势。

表1 皇甫川流域降水量年际变化特征

Tab. 1 Annual variation characteristics of precipitation in Huangfuchuan basin

时期	平均值/mm	变异系数(C_v)	极值比(EVR)
1954—1969年	470.68	0.37	3.39
1970—1986年	398.72	0.25	2.47
1987—2001年	373.03	0.26	2.31
2002—2018年	444.68	0.29	2.75
1954—2018年	419.78	0.30	2.73

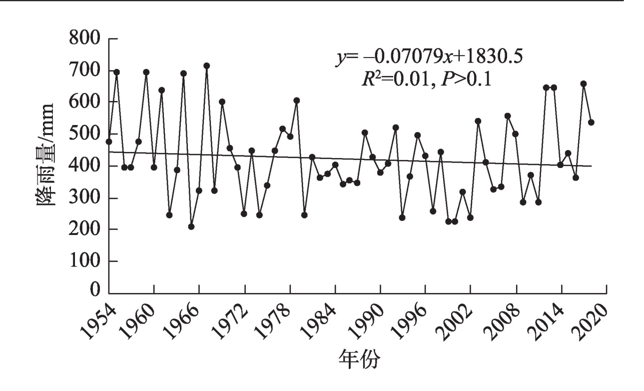


图2 皇甫川流域降水量年际变化趋势

Fig. 2 Linear trend of the Huangfuchuan basin for precipitation

2.2 径流量和输沙量年际变化特征

2.2.1 径流量年际变化特征 从表2和图3a可以看出，1954—2018年皇甫川年均径流量为1.23×10^8 m^3，变异系数为0.74，属于中等尺度变异，径流量变异系数变动范围为0.56~1.01。径流量极值比介于6.76~21，其均值为14.51。径流量变化速度为−3.62×10^6 m^3·a^{-1}（$P<0.05$），达到了显著水平，表明1954—2018年皇甫川流域径流量呈显著减小趋势。

2.2.2 输沙量年际变化特征 从表2和图3b可以看出，1954—2018年皇甫川流域年均输沙量为3.7×10^7 t，变异系数为0.97，属于中等尺度变异。输沙量变异系数介于0.63~1.39，其平均值为0.97。输沙量极值比介于14.13~44.04，其平均值为33.05。输沙量变化速度为−1.17×10^5 t·a^{-1}（$P<0.05$），达到了显著水平，表明1954—2018年皇甫川流域输沙量呈显著减小趋势。

径流量和输沙量趋势检验Z值均为负，通过了显著性为99%的检验，表明径流量和输沙量减少趋势明显，径流量趋势检验Z值为−6.03，输沙量趋势检验Z值为−5.76，径流量减少趋势大于输沙量减少趋势。径流量Sen's斜率值为−0.036，输沙量Sen's斜

表2 皇甫川流域径流量和输沙量年际变化特征

Tab. 2 Changes of average annual runoff and sediment load in the Huangfuchuan basin

时期	径流量			输沙量		
	平均值/10^8 m^3	变异系数(C_v)	极值比(EVR)	平均值/10^8 t	变异系数(C_v)	极值比(EVR)
1954—1969年	2.07	0.64	12.36	0.61	0.80	32.75
1970—1986年	1.58	0.56	6.76	0.53	0.63	14.13
1987—2001年	0.92	0.75	17.92	0.29	1.07	44.04
2002—2018年	0.34	1.01	21	0.06	1.39	41.48
1954—2018年	1.23	0.74	14.51	0.37	0.97	33.05

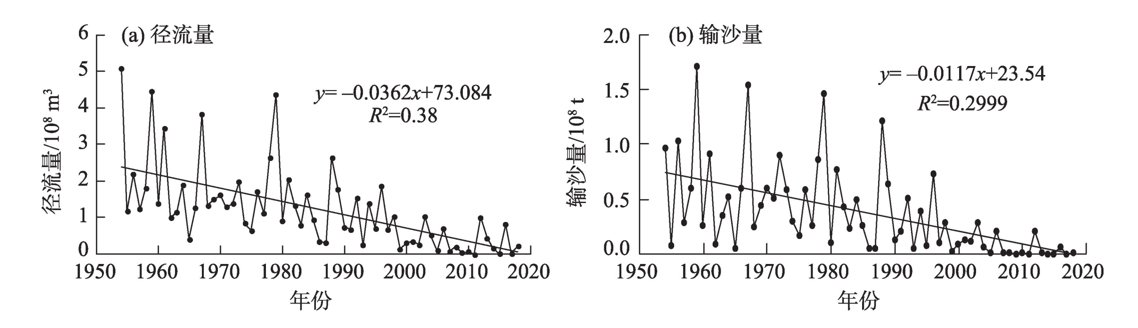


图3　皇甫川流域径流量和输沙量变化趋势

Fig. 3　Linear trend of the Huangfuchuan basin for runoff and sediment load

率值为−0.017,径流量和输沙量Sen's斜率值也都为负值,表明皇甫川流域径流量和输沙量均呈下降趋势,且径流量减少趋势大于输沙量减少趋势。Mann-Kendall趋势检验与Sen's斜率值的研究结果一致。

2.3　径流量和输沙量阶段性变化特征

从图4可以看出,皇甫川流域径流量和输沙量累积距平曲线具有明显阶段性特征。皇甫川径流量和输沙量累积距平值都在1986年达到最大值,表明径流量和输沙量都在1986年发生突变。根据突变年份可以将皇甫川流域径流量和输沙量分为1954—1986年和1987—2018年两个阶段。1954—1986年年均径流量为1.84×10^8 m^3,1987—2018年年均径流量为0.66×10^8 m^3,突变后年均径流量比突变前减少188%。1954—1986年年均输沙量为1.833×10^9 t,1987—2018年年均输沙量为5.83×10^8 t,突变后多年年均输沙量比突变前减少了214%。

根据*UF*、*UB*曲线交点位置,可以确定皇甫川径流量和输沙量突变都是从1986年开始(图5a,图5b),这与累积距平检验结果一致。

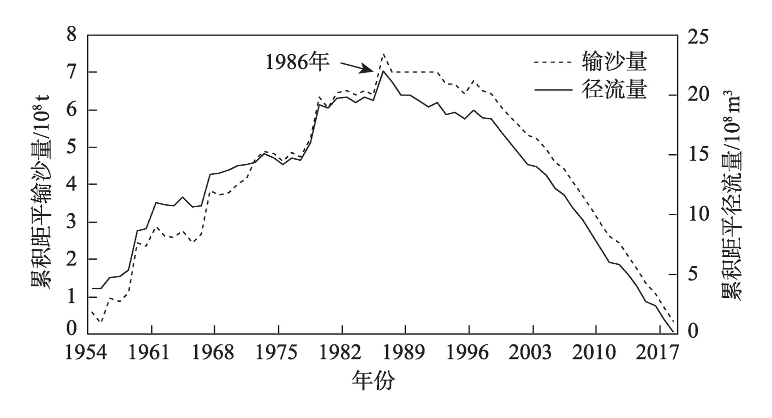


图4　皇甫川流域径流量和输沙量的累积距平检验

Fig. 4　Test of cumulative anomaly of runoff and sediment transport in Huangfuchuan basin

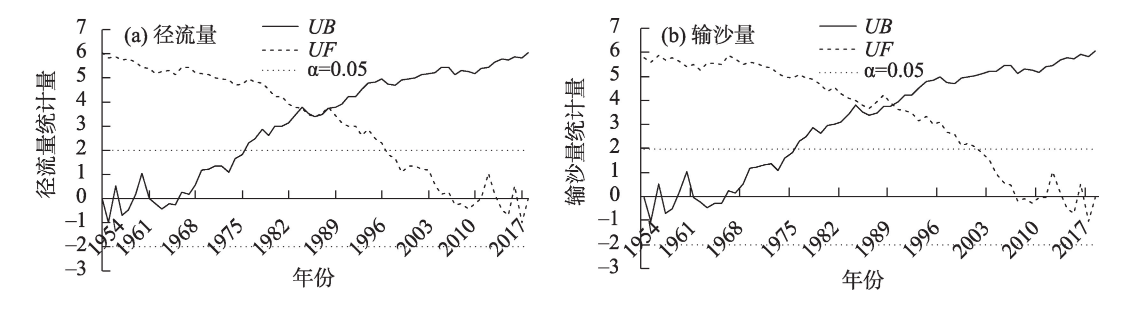


图5　皇甫川流域径流量和输沙量Mann-Kendall 突变检验

Fig. 5　Mann-kendall test of the Huangfuchuan basin runoff and sediment transport

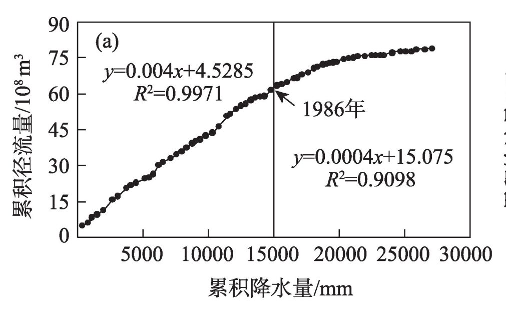
2.4 降水变化和人类活动对皇甫川流域水沙变化的影响

以皇甫川流域径流量和输沙量突变点以1986年为分界点，将皇甫川流域的降水量、径流量以及输沙量划分为两个时期1954—1986年和1987—2018年。

从图6看出，降水-径流与降水-输沙双累积曲线都出现了拐点，突变年之后曲线斜率小于突变年之前的曲线斜率。突变之前累积径流量变化幅度大于累积输沙量变化幅度，累积径流量曲线斜率大于累积输沙量曲线斜率，这主要由于降水量增加，使河道径流量增加，导致河道输水能力大大提高，并且这种能力大于河道输沙能力；突变年之后累积径流量变化幅度小于累积输沙量变化幅度，累积输沙量曲线斜率大于累积径流量曲线斜率，这主要由于径流量减少导致输沙能力降低，大量泥沙淤积在河道里。

将突变年后降水资料带入双累积曲线建立的回归方程，得到降水变化和人类活动对水沙变化影响的相关关系方程式，其相关系数达到了0.9显著性水平以上，显著性水平$P<0.05$，达到了显著水平。以1954—1986年为基准期，1987—2018年人类活动对皇甫川流域径流量的影响为83.04%，降水变化对皇甫川流域径流量影响为16.96%，人类活动在皇甫川流域径流量的变化中起了主要作用(表3)。

以1954—1986年为基准期，1987—2018年人类活动对皇甫川流域输沙量的影响为75.24%，降水变化对皇甫川流域输沙量影响为24.76%，人类活动在皇甫川流域径流量变化中起了主要作用(表4)。结合皇甫川流域1954—2018年降水量呈现出不显著下降趋势(图2)，而皇甫川流域的水沙变化特征却呈现出显著减少趋势(图3)，表明流域内逐年增强的人类活动是促使皇甫川流域径流和泥沙减少的主要因素，而降水变化引起的降水减少是次要



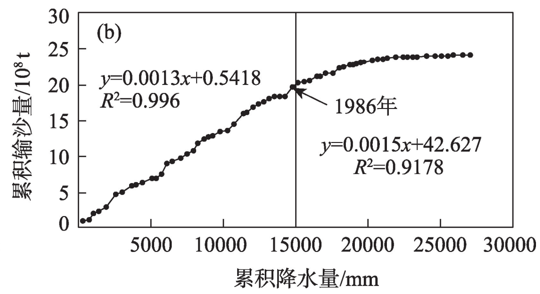


图6 降水量-径流量与降水量-输沙量双累积曲线

Fig. 6 Precipitation-runoff and precipitation-sediment transport double cumulative curve

表3 皇甫川流域径流量变化原因分析

Tab. 3 Causes analysis of runoff variation in Huangfuchuan basin

时期	实测径流量 /10^8 m^3	计算径流量 /10^8 m^3	实测年降水量		降水影响		人类活动影响	
			减少量 /10^8 m^3	百分比 /%	减少量 /10^8 m^3	百分比 /%	减少量 /10^8 m^3	百分比 /%
1954—1986年	58.13	60.20	–	–	–	–	–	–
1987—2018年	20.12	51.68	38.01	65.38	6.45	16.96%	31.56	83.04%

表4 皇甫川流域输沙量变化原因分析

Tab. 4 Causes analysis of sediment transport variation in Huangfuchuan basin

时期	实测输沙量 /10^8 t	计算输沙量 /10^8 t	实测年降水量		降水影响		人类活动影响	
			减少量 /10^8 t	百分比 /%	减少量 /10^8 t	百分比 /%	减少量 /10^8 t	百分比 /%
1954—1986年	18.33	18.63	–	–	–	–	–	–
1987—2018年	5.77	15.23	12.56	68.52	3.11	24.76%	9.45	75.24%

因素。

通过公式(2)和公式(3)分别计算不同时期输沙特征因子(S、P、f、s)的比例变化率,从而确定各因子对皇甫川输沙量变化的贡献程度。如表5所示,1954—2018年皇甫川输沙量总体呈下降趋势,输沙量的比例变化率为0.49%·a^{-1}。其中,85%变化率下降由产流因子f所贡献,29%变化率下降由产沙因子s所贡献,而p的变化趋势与输沙量相反,贡献了输沙量比例变化率的−4%。皇甫川流域径流量和输沙量突变均是从1986年开始,将输沙量的变化分为1954—1986年和1987—2018年两个时期进行分析。在1954—1986年期间,输沙量有明显的上升,其比例变化率为0.54%·a^{-1},其中f因子贡献了比例变化率的90%,s因子贡献了比例变化率的31%,而P因子贡献了比例变化率的−21%。在1986—2018年,输沙量的比例变化率为0.36%·a^{-1},具有明显下降趋势,其中f因子贡献了输沙比例变化率的91%,s因子贡献了比例变化率的25%,P因子贡献了比例变化率的−16%。从3个变化阶段的分析结果可以看到,皇甫川流域产流因子f对输沙量的比例变化率起着决定性作用,产沙因子s对输沙量比例变化率的贡献相对较小,而降水因子P甚至起着相反作用。

表5　不同时期输沙特征因子的比例

Tab. 5　Proportion of sediment transport characteristic factors in different periods

因子	1954—2018年	1954—1986年	1986—2018年
P/(%·a^{-1})	−0.07	−0.09	−0.06
f/(%·a^{-1})	0.42	0.49	0.33
s/(%·a^{-1})	0.14	0.17	0.09
总计	0.49	0.54	0.36

3　讨论

降雨是径流补给的主要来源,直接影响着径流大小,而径流的变化会影响到输沙变化,所以降水成为影响径流和输沙的决定因素之一。气象资料研究表明,皇甫川流域降水具有减少趋势[15],气候总体呈暖干化方向发展,气候变化引起的降水减少对皇甫川流域径流量和输沙量产生重要影响[16]。1954—2018年皇甫川流域降水呈现下降趋势(图2),水沙与降水有相同的变化趋势(图3),表明降水是影响流域水沙的重要因素。赵广举等[9]通过水文分析法定量评价了降水和人类活动对皇甫水文站水沙变化的贡献率,得出降水量变化对径流量的贡献率为25.8%,降水量对输沙量的影响与之相似。万晓丹等[15]采用线性趋势法对皇甫川流域1954—2016年径流量和输沙量进行了研究,计算出皇甫川流域多年平均降水量为424 mm,降水量减少是导致皇甫川流域水沙量相应减少的重要因素。胡智丹等[17]运用水文敏感性分析法探究了皇甫川流域径流锐减的原因,得出皇甫川流域天然时期(1985—1998年)和径流变化时期(1999—2006年)相比,降水减少对径流量变化的贡献率为46%。以上相关研究结论都与本研究结论一致。但皇甫川流域降水变化呈现出不显著减小趋势(P>0.1),而水沙变化却呈现出显著趋势(P<0.05),水沙下降趋势相比于降水更加显著,降水影响皇甫川流域产水产沙能力随时间的变化在减弱,并非是影响水沙变化的唯一因素,还有其他重要因素对水沙变化产生影响。

人类活动是指城镇化建设、水土保持过程、生产生活用水、水利工程修建等各种直接对流域径流量和输沙量或改变下垫面条件产生影响的活动[5]。皇甫川流域水沙变化受流域内一些人类活动(退耕还林还草、淤地坝建设、水保过程等)的影响,使得流域下垫面发生了明显改变,对水沙扰动增加,减少了河流的径流量和输沙量,尤其是2000年皇甫川流域开始了大规模的退耕还林草工程,造成流域内大量的耕地变为草地、林地,在一定意义上起到水土保持、防风固沙的作用,其次是一些免耕、少耕等保护性耕作技术大力推广,直接减少了水土流失的物质来源,作物种植结构、种植密度优化,使得地表裸土面积减少,有效拦截降雨,减少地面侵蚀,改善了土壤结构,使得土壤空隙增加,透水性加强,减少了地面径流和输沙的效果[12]。慕星等[16]采用水文分析法定量评价了降水和人类活动对皇甫水文站水沙变化的贡献率,发现在20世纪80年代,人类活动对皇甫川流域径流变化的贡献率为77.5%,90年代人类活动对皇甫川流域年径流变化的贡献率为56.4%。刘微等[18]采用CPA法对皇甫川径流进行突变分析,根据皇甫川流域在20世纪90年代城镇化的发展,城镇用地面积增大,植被种类改变,生态平衡遭到破坏,造成径流量随之减小,得出人类活动是2000年后皇甫川流域径流量减少的主导因素。赵广举等[9]通过对皇甫川日径流量与日输沙率的变

化特征研究发现,在同期降水量并没有显著减少的情况下,皇甫川输沙减少的主要原因是由于河道内存在的大量淤地坝有效地蓄水拦沙,在1976年以前,皇甫川流域共建成淤地坝392座,而到2015年,淤地坝的数量达到了886座,控制了整个流域70%的径流,河道径流被拦蓄后,上游来水失去了冲刷下游河道的动力,从而达到减蚀的效果,得出人类活动是导致皇甫川流域水沙急剧减少的主要原因。以上相关研究结论与本研究结论一致,可以得出气候变化引起降水减少与人类活动是导致皇甫川流域径流量和输沙量减少的影响因素,其中流域内逐年增强的人类活动是促使皇甫川流域径流和输沙减少的主要因素,而气候变化引起的降水减少是次要因素。

4 结 论

本文利用皇甫川流域1954—2018年水沙长时间序列监测数据,运用线性趋势法、Mann-Kendall检验、累积距平法等方法分析了皇甫川流域水沙周期演变特征,应用水文分析法定量评估了降水变化和人类活动对皇甫川流域径流量和输沙量变化的贡献率,采用输沙归因诊断分析判断了降水、产流能力和产沙能力在皇甫川输沙量比例变化率上的贡献,主要得出以下结论:

(1) 皇甫川流域降水量呈不显著减小趋势,而径流量和输沙量却呈显著减小趋势,且径流量减少趋势大于输沙量的减少趋势。

(2) 降水变化和人类活动是造成皇甫川流域水沙减少的影响因素,其中流域内逐年增强的人类活动是促使皇甫川流域径流和输沙减少的主要因素,而气候变化引起的降水减少是次要因素。

(3) 不同阶段输沙归因诊断分析表明,产流因子f对皇甫川输沙量的比例变化率起着决定性作用,产沙因子s对输沙量比例变化率的贡献相对较小,而降水因子p起着相反作用。

参考文献(References):

[1] 穆兴民, 王万忠, 高鹏, 等. 黄河泥沙变化研究现状与问题[J]. 人民黄河, 2014, 36(12): 1−7. [Mu Xingmin, Wang Wanzhong, Gao Peng, et al. Progress and discussion on sediment load variation research of the Yellow River[J]. Yellow River, 2014, 36(12): 1−7.]

[2] 喻锋, 李晓兵, 王宏. 生态安全条件下土地利用格局优化——以皇甫川流域为例[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3198−3210. [Yu Feng, Li Xiaobin, Wang Hong. Optimization of land use pattern based on eco-security: A case study in the huangfuchuan watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3198−3210.]

[3] Gao P, Mu X M, Wang F, et al. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(1): 1−10.

[4] Zhou Y, Yang Z, Zhang D, et al. Inter-catchment comparison of flow regime between the Hailiutu and Huangfuchuan rivers in the semi-arid Erdos Plateau, Northwest China[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2015, 60(4): 688−705.

[5] Hou S Z, Wang P, Quo Y, et al. Response of bankfull discharge of the Inner Mongolia Yellow River to flow and sediment factors[J]. Journal of Earth System Science, 2014, 123(6): 1307−1316.

[6] 胡春宏, 张晓明. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1028−1039. [Hu Chunhong, Zhang Xiaoming. Several key questions in the researches of runoff and sediment changes and trend predictions in the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1028−1039.]

[7] Gao P, Li P, Zhao B, et al. Use of double mass curves in hydrologic benefit evaluations[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(26): 4639−4646.

[8] Zhou Y Y, Shi C X, Fang X L, et al. The influence of climate change and anthropogenic activities on annual runoff of Huangfuchuan basin in northwest China[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2015, 120: 137−146.

[9] 赵广举, 穆兴民, 温仲明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对水沙变化的定量分析[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 1−8. [Zhao Guangju, Mu Xingmin, Weng Zhongmin, et al. Impacts of precipitation and human activities on streamflow and sediment load in the Huangfuchuan watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(4): 1−8.]

[10] 魏艳红, 焦菊英. 皇甫川流域1955—2013年水沙变化趋势与周期特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 1−6. [Wei Yanhong, Jiao Juying. Variation tendency discharge and periodic characteristics of stream flow and sediment in Huangfuchuan watershed from 1955 to 2013[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 1−6.]

[11] 刘强, 穆兴民, 赵广举, 等. 延河流域水沙变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(7): 129−135. [Liu Qiang, Mu Xingmin, Zhao Guangju, et al. Variation tendency discharge and periodic characteristics of stream flow and sediment in Huangfuchuan watershed from 1955 to 2013[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(7): 129−135.]

[12] 刘柏君, 雷晓辉, 刘争胜, 等. 皇甫川流域降水基流特征及其响应关系[J]. 人民黄河, 2016, 38(4): 7−12. [Liu Bojun, Lei Xiaohui,

Liu Zhengsheng, et al. Respective characteristics and mutual response relationship of precipitation and base-flow in Huangfuchuan Basin[J]. Yellow River, 2016, 38(4): 7−12.]

[13] 邵广文, 管仪庆, 管章岑, 等. 皇甫川径流变化趋势及成因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(3): 53−56. [Shao Guangwen, Guan Yiqing, Guan Zhangcen, et al. Analysis of variation trend of runoff and driving factors in Huangfuchuan[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(3): 53−56.]

[14] 薛天翼, 武旭同, 朱晨怡, 等. 红水河流域输沙量变化及其影响因素[J]. 地理科学进展, 2019, 38(5): 772−782. [Xue Tianyi, Wu Xutong, Zhu Chenyi, et al. Change of sediment load and its influencing factors in the Hongshui river basin in southwestern china [J]. Progress in Geography, 2019, 38(5): 772−782.]

[15] 万晓丹, 周晓岚, 赵丽霞, 等. 皇甫川流域水沙变化趋势及影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2019, 61(12): 90−93. [Wan Xiaodan, Zhou Xiaolan, Zhao Lixia, et al. An analysis of the trend of water and sediment change and its influencing factors in Huangfuchuan river basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019, 61(12): 90−93.]

[16] 慕星, 张晓明. 皇甫川流域水沙变化及驱动因素分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(5): 933−939. [Mu Xing, Zhang Xiaoming. The variation of runoff volume and sediment load and its driving factors in Huangfuchuan river watershed[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(5): 933−939.]

[17] 胡智丹, 夏婷, 罗琳, 等. 气候变化对河川径流量的影响——以皇甫川流域为例[J]. 水利水电技术, 2018, 49(2): 30−36. [Hu Zhidan, Xia Ting, Nuo Lin, et al. Impact from climate change on amount of river runoff: A case of Huangfuchuan Watershed[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(2): 30−36.]

[18] 刘微, 张丹蓉, 管仪庆, 等. 1954—2010年皇甫川流域基流变化及原因分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(8): 21−23. [Liu Wei, Zhang Danrong, Guan Yiqing, et al. Analysis of the base flow variation and cause in Huangfuchuan from 1954 to 2010[J]. Yellow River, 2014, 36(8): 21−23.]

Characteristics of water and sediment variation in the Huangfuchuan basin and its influencing factors

LIU Qiang[1,2], YU Feihong[1], CHANG Kangfei[1], WANG Rui[1], JING Yuanning[1], MU Xingmin[2]

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, Gansu China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Based on monitoring data of precipitation, runoff, and sediment discharge in the Huangfuchuan basin during 1954−2018, the characteristics of water and sediment cycle evolution in Huangfuchuan basin were studied using linear trend methods, Mann-Kendall tests, and cumulative anomaly methods. The contribution rates of precipitation change and human activities to runoff and sediment transport change in the Huangfuchuan basin were quantitatively evaluated using hydrological analysis methods. The results show that precipitation does not significantly decrease with time, whereas runoff and sediment transport significantly decrease with time, with a greater decreasing trend in runoff than sediment transport. The abrupt change of runoff and sediment transport from abundant to dry occurred in 1986. Using 1954−1986 as a reference period, the impacts of human activity on runoff and sediment transport in the Huangfuchuan basin from 1987 to 2018 were 83.04% and 75.24%, respectively. The impact of precipitation change on runoff and sediment transport in the Huangfuchuan basin was 16.96% and 24.76%, respectively. Further, reduced runoff capacity contributed more than 85% to changes in sediment transport. Precipitation change and human activities are both important factors influencing reduced runoff and sediment in the Huangfuchuan basin. Increasing human activities in the basin are the main factors reducing runoff and sediment transport in the Huangfuchuan basin, with reduced precipitation caused by climate change as a secondary factor.

Keywords: Huangfuchuan basin; precipitation; human activities; runoff; sediment runoff